

FAを用いたセメント硬化体の物質移動抵抗性がk値に及ぼす影響に関する基礎的研究

群馬大学工学部 学生会員 ○笠見 智大
 群馬大学大学院 正会員 李 春鶴
 群馬大学大学院 学生会員 上原 丈児

1. はじめに

近年、コンクリート分野においても資源の有効利用の観点から、フライアッシュなどを使用することが注目されているが、土木学会コンクリート標準示方書によると、中性化速度係数の予測式に用いられるk値は、フライアッシュでは0とされている。一方、佐伯¹⁾らは、フライアッシュの中性化抑制に関する貢献度のk値が水結合材比とフライアッシュの置換率の関数関係として表すことができると報告されている。しかし、この推定式は過去の研究データから提案されたものであり、具体的に炭酸化がどのように進行し、抑制効果を持つのかについてはまだ十分に検討されていない。

そこで、本研究では、混和材としてフライアッシュを使用したセメント系硬化体の炭酸化進行に伴う物質移動抵抗性や組成の変化がk値に与える影響について検討する。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

本研究では普通ポルトランドセメントのみを使用するNシリーズと、フライアッシュをセメント質量の30%置換したFAシリーズの2種類の供試体を作製した。いずれの供試体もW/B=60%とし、材料分離を防ぐため、分離低減剤を6kg/m³ずつ添加した。練混ぜ後、φ96×5mmの円盤型枠に打ち込んだ。

2.2 養生条件

図-1に養生および暴露条件を示す。打ち込み後、40℃で48時間の封緘養生を行い脱型後、前養生として40℃での26日間水中養生を行った。その後、CO₂を極力除去した環境(DN)で7日間乾燥させ、それぞれ気中暴露に供した。暴露条件はDN環境、室内濃度のCO₂環境(DA)の2条件とし、温度が20±3℃、相対湿度が60±5%に調整した。

2.3 測定項目

本研究では材齢35、63、91日にて中性化深さ、酸素分散試験、水銀圧入試験、熱分析の測定を行った。

材齢(日)	0	2	28	35	63	91
打込み	封緘養生	水中養生	DN (CO ₂ 0%)	DN(CO ₂ 0%)		
				DA(CO ₂ 0.04%)		
温度	40℃			20℃		

図-1 養生および暴露条件

中性化深さでは供試体の割裂断面に1.0(w/v%)フェノールフタレイン溶液を吹き付け、中性化深さを測定した。3点の計測を行い、平均値を用いた。

酸素拡散係数の測定には、白川らが提案する酸素拡散係数測定方法²⁾を用いた。供試体は3体ずつ測定し、その平均値を酸素拡散係数とした。

水銀圧入試験では供試体を5mm程度に粗粉碎し、試料中の水分をアセトンで置換し、水和を停止させ、その後40℃で48時間真空乾燥を行った。水銀圧入試験装置を用いて細孔直径分布、総細孔量を計測した。

熱分析では所定の材齢にて熱分析を行い、水酸化カルシウム量、炭酸カルシウム量を算出した。測定はN₂フロー環境下で行い、水酸化カルシウム量は370~450℃、炭酸カルシウム量は550~800℃の熱重量変化により算出した。

3. 実験結果と考察

3.1 中性化深さ結果によるk値の算出

コンクリート標準示方書の中性化速度係数の予測式(1)にDA環境での中性化深さ測定結果を用いてk値を算出した。

$$y = \{a + b \cdot (W/C + k \cdot A)\} \sqrt{t} \quad (1)$$

ここで、y:中性化深さ(mm), a,b:結合材の種類に応じて実績から定まる係数, W:単位体積あたりの水の質量(kg/m³), C:単位体積あたりのセメントの質量(kg/m³), A:単位体積あたりの混和材の質量(kg/m³), \sqrt{t} :暴露期間(週)

表-1に示す実験結果を用いて、係数a, bを算定した。ここで、過去の研究³⁾での実験は、不十分な養生による中性化実験であり、本実験は、十分な養生を行ってからの中性化実験である。その算定結果のa=-0.4367, b=1.9333と式(1)を用いると、中性化測定材齢63日および91日のk値がそれぞれ1.32および0.75となる。

キーワード フライアッシュ, 炭酸化, k値, 物質移動抵抗性

連絡先 〒376-8515 群馬県桐生市天神町1-5-1 群馬大学工学部 TEL0277-30-1613 FAX0277-30-1601

表-1 各条件の X

養生	W/C(%)	X(中性化速度係数)
過去の研究 ³⁾	30	0.16
	45	0.40
本実験	60	0.74

シリーズ	環境	材齢	酸素拡散係数 (×10 ⁻⁸ m ² /s)				
			0	5	10	15	20
N	暴露前	35日	25.03				
		63日	19.58				
	DN	91日	22.32				
		63日	18.06				
FA	暴露前	35日	6.98				
		63日	7.42				
	DN	91日	7.53				
		63日	13.31				
DA	91日	22.52					

図-2 酸素拡散係数

一方、佐伯らの式(2)では本実験の k 値は 0 となる。
 $(W/C+F) \times (F/C+F)^{0.25} \leq 0.35$ の時、 $k=0.2$ (2)¹⁾
 $(W/C+F) \times (F/C+F)^{0.25} > 0.35$ の時、 $k=0$

ここで、W/C+F:水結合材比, F/C+F:フライアッシュ置換率

本実験では水中養生によって、ポズラン反応が促進され、細孔構造が密になったことで物質移動抵抗性が大きくなり、炭酸化が進まず、見かけ上のフライアッシュの貢献度が大きくなったためと考えられる。一方で、佐伯式は養生の影響が直接に反映されていないためと考えられる。したがって、フライアッシュの中性化抵抗性を増大させる方法としての十分な養生をさせる傾向が増える現段階で、その k 値の推定において、養生の影響も考慮しなければならないと考えられる。

3.2 物質移動抵抗性が k 値に及ぼす影響

図-2に各シリーズの酸素拡散係数を示す。N と FA の暴露前の酸素拡散係数を比べると、FA の方が小さい。暴露後は、N は乾燥および炭酸化により酸素拡散係数が小さくなる傾向がある反面、FA は乾燥および炭酸化により酸素拡散係数が大きくなる傾向を示す。十分な養生をさせた FA 供試体は、酸素拡散係数が非常に小さいし、炭酸化初期の材齢 63 日までは、酸素拡散係数が N より小さいため、炭酸化初期の k 値が 1.32 の大きい値をとると考えられる。これは、図-3に示す、材齢 35 日の水銀圧入試験の結果からも確認できる。すなわち、十分な養生をさせた場合、FA はポズラン反応による緻密な細孔構造形成され、セメントのみの供試体より炭酸化抵抗性が大きいことが認められる。一方で、炭酸化の進行により、酸素拡散係数が増加し、k 値も小さくなることを確認できる。これは、炭酸化初期の分析と同様に、材齢 91 日の水銀圧入試験の結果からも確認できる。すなわち、炭酸化の進行に伴い、N で総細孔量はほぼ変化なく、ピーク径は小さくなっているが、FA では総細孔量は

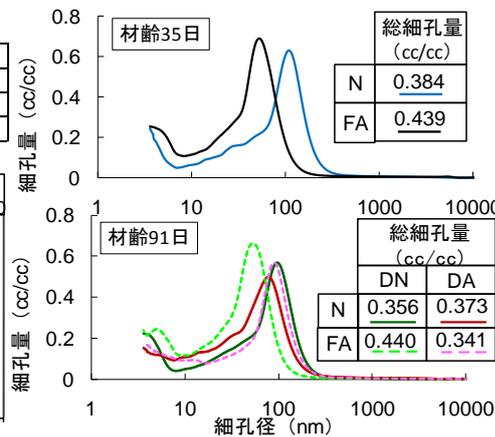


図-3 細孔径分布

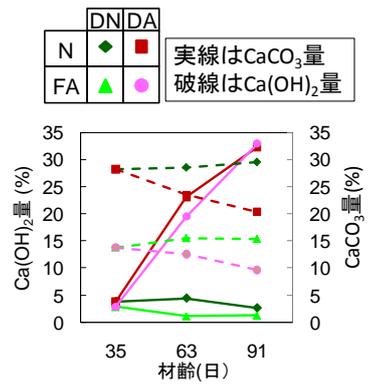


図-4 熱分析結果

小さくなるものの、物質移動に有利な大きな径の細孔が増えている。したがって、炭酸化の進行に伴い、FA の細孔構造の粗大化が顕著になり、炭酸化抵抗性が見かけ上減少し、k値が小さくなると考えられる。

図-4に熱分析の結果を示す。Ca(OH)₂量は、NとFA両シリーズで大きな差がある。これはポズラン反応によりCa(OH)₂が消費されたことと、フライアッシュ置換によるセメント量減少が原因と考えられる。また、炭酸化によるCa(OH)₂消費量はNの方が多いのに対し、CaCO₃生成量はNとFAでほぼ同じである。これより、FAではC-S-H由来の炭酸化生成物が多く生成され、このために細孔構造が粗大化し²⁾、酸素拡散係数が増加したと推察できる。その結果、k値が材齢の経過によって減少していたと考えられる。

4. まとめ

フライアッシュの中性化抵抗性を増大させる方法としての十分な養生をさせる傾向が増える現段階では、k 値の推定には養生の因子の取り入れも必要になると考えられる。また、材齢の経過や炭酸化の進行によって、細孔構造や組成が変化し、それに伴い酸素拡散係数が変化するため、k 値が変化することが明らかになった。

【参考文献】

- 1) 佐伯竜彦: 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術, コンクリートライブラリー132, 2010, pp137-140
- 2) 白川敏夫ほか: セメント硬化体中への気体の拡散係数測定方法の提案, 日本建築学会構造系論文集, No515, 1999, pp15-21
- 3) 石井祐輔ほか: 若材齢時の炭酸化によるセメント系硬化体の組成と空隙構造の変化が酸素拡散係数及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, 2010, No.1, pp.617-622